

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**PRIORITY
DOCUMENT**SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

REC'D 21 JUN 2000

WIPO

PCT

EP00/04167

Bescheinigung

4

Die Deutsche Telekom AG in Bonn/Deutschland hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle"

am 12. Februar 2000 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht und erklärt, dass sie dafür die Innere Priorität der Anmeldung in der Bundesrepublik Deutschland vom 25. Mai 1999, Aktenzeichen 199 23 614.3, in Anspruch nimmt.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig die Symbole H 01 S und B 81 C der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 3. April 2000

Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident

Im Auftrag



Aktenzeichen: 100 06 361.6

Joost

B E S C H R E I B U N G**MINIATURISIERTE TERAHERTZ-STRAHLUNGSQUELLE**

Die Erfindung betrifft eine miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Es ist grundsätzlich bekannt, daß kohärente Strahlung bei bestimmten Frequenzen im fernen Infrarotbereich zum Beispiel durch Moleküllaser, die mit CO₂-Lasern gepumpt werden, erzeugt werden kann. Im Wellenlängenbereich von 3 mm bis 30 µm (von 100 Gigahertz bis 10 Terahertz) liegen viele der für die Spektroskopie von Molekülen und Festkörpern interessierenden Frequenzen und Wellenlängen. Der Einsatz einer auf einem Halbleiterchip eines Wavars realisierten und im Wellenlängenbereich durchstimmbaren Mikrostrahlungsquelle für diesen Bereich der Terahertz-Strahlung mit ausreichender Ausgangsleistung im Bereich zwischen 1 µW und 1 W ist von hoher technischer Bedeutung für spektroskopische Anwendungen in allen Fragen des Umweltschutzes, der Analytik und Materialcharakterisierung in Medizin und Biologie sowie der Chemie und Physik. Eine weitere Möglichkeit kohärente Strahlung im fernen Infrarotbereich zu generieren beruht auf dem sogenannten Smith-Purcell-Effekt. Die Strahlung wird hierbei in ähnlicher Weise generiert wie es beim "freien Elektronenlaser" bekannt ist. Hier wird mit Hilfe von makroskopischen Elektronenquellen und Beugungsgittern mit 100 bis 300 µm Periode ein kohärentes Strahlungsfeld mit polarisierter Strahlung mit bis zu 1 µW Leistung erzeugt.

Unter dem Titel "Intensity of Smith-Purcell radiation in the relativistic regime" von J. Walsh, K. Woods, S. Yeager,

Department of Physics and Astronomy, Dartmouth College, Hanover, NH 03755, USA, pages 277-279, ist die Theorie derartiger Smith-Purcell-Strahlungsquellen angegeben und diskutiert und außerdem sind in diesem Artikel experimentelle Ergebnisse angegeben. Weiterhin ist in dem Artikel im LEOS NEWSLETTER, February, 1999 von J.E. Walsh, J.H. Brownell, J.C. Swartz, Department of Physics and Astronomy, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire 03755-3528 und M.F. Kimmitt, Department of Physics, Essex University, Colchester, UK, January 7, 1999, pages 11-14, grundsätzlich der Aufbau und die Wirkungsweise einer Strahlungsquelle im Terahertz-Gebiet unter dem Titel "A New Source of THz-FIR Radiation" beschrieben. Diese bekannten Terahertz-Strahlungsquellen sind zwar durchaus leistungsfähig, reichen jedoch für viele analytische Anwendungen noch nicht aus und sind noch nicht genügend miniaturisiert.

Ein weiter miniaturisierter freier Elektronenlaser für analytische Anwendungen in Form einer leistungsfähigeren Quelle ist deshalb wünschenswert.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, eine miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt auf einem Halbleiterchip mit Hilfe der bekannten additiven Nanolithographie zu schaffen, die als miniaturisierter freier Elektronenlaser arbeitet, wesentlich leistungsfähiger ist als die bisherigen entsprechenden Strahlungsquellen und einen wesentlich größeren Anwendungsbereich, insbesondere für analytische Anwendungen ermöglicht.

Die erfindungsgemäße Lösung der Aufgabe ist im Kennzeichen des Patentanspruchs 1 charakterisiert.

Weitere Lösungen bzw. Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Patentansprüchen 2 bis 23 charakterisiert.

Durch die Anwendung der additiven Nanolithographie für die Herstellung von derartigen miniaturisierten Terahertz-Strahlungsquellen wird die Realisierung von Feldelektronenquellen hohen Richtstrahlwertes erreicht. Durch zusätzliche miniaturisierte elektronenoptische Elemente wie Beschleunigungsgitter, Fokussierungslinsen, Strahlablenker und freistehende metallische Stäbe kann nun in Zusammenfügung der Komponenten ein miniaturisierter freier Elektronenlaser auf einer Fläche von wenigen $100\text{ }\mu\text{m}^2$ bis 10 mm^2 aufgebaut werden. Die Elektronenquelle hat dabei die Charakteristik, bei 30 Volt Elektronen zu emittieren, die dann eine Energie von 30 Elektronenvolt besitzen. Durch die Anwendung der Nanolithographie ist es möglich, die zweite charakteristische Komponente der Fokussierung und Strahlführung des Elektronenstrahles parallel zur Oberfläche in einem endlichen Abstand von der dritten Komponente, einem metallischen Gitter, zu führen. Die Höhenlage des Strahls über dem metallischen Gitter kann ebenfalls durch Ablenkspannungen eingestellt werden, die an mikrominiaturisierte Ablenkplatten bzw. Drahtlinsen angelegt werden. Das Beugungsgitter, möglichst bis zu einem Millimeter lang, ein Metallgitter mit einer Gitterkonstante im Bereich von $0,1\text{ mm}$ bis $0,1\text{ }\mu\text{m}$, kann durch konventionelle Lithographie bei der Herstellung der elektrischen Anschlußstrukturen zur Versorgung der Feldelektronenquelle erzeugt werden bzw. durch Elektronenstrahllithographie mit höchster Auflösung definiert werden.

Mit Vorteil wird eine hochauflösende Doppellacktechnik und Lift-Off angewandt. Bei der vorliegenden Lösung wird durch den Einsatz der neuartigen Technologien die Integration der

Elektronenquelle, die Strahlführung und die Erzeugung der Ferninfrarotstrahlung durch den Flug der schnellen Elektronen über die Beugungsgitter hinweg erzielt. Dabei werden bei standardmäßigen Quellen bis ca. 20.000 Volt Beschleunigungsspannung und einem Elektronenstrahl von 20 μm Durchmesser über einem Gitter von 100 bis 300 μm Periode, eine Infrarotstrahlung im fernen Infrarot zwischen 100 μm und einem Millimeter Wellenlänge erzielt. Diese Strahlung entsteht durch die beim Vorbeiflug der Elektronen schwingende Bildladung, die wegen dem Oberflächenprofil des Gitters schwingt. Durch den wechselnden Abstand der Ladungen entsteht ein schwingender Dipol, der längs des Gitters in kohärenter Weise schwingt. Dies erfolgt durch die Coulomb-Wechselwirkung der einzelnen Ladungen auf den Drähten. Dabei schwingt entsprechend der einzelnen Ladungen der Stäbe das gesamte elektrische Feld kohärent. Auf diese Weise wird längs des ganzen Gitters kohärent elektromagnetische Strahlung abgestrahlt. Ihr Energietransfer erfolgt nahezu verlustlos aus dem Elektronenstrahl in die elektromagnetische Strahlung. Die Polarisierung erfordert einen gewissen Verschiebestrom und damit eine gewisse Leistung, aber diese wird voll direkt dem Strahl entzogen und auf diese Weise wird die schwingende Dipol-Ladungskette erzeugt. Neuartig ist auch die auf einem Chip integrierte Führung der Elektronen und die direkte Kopplung an das Gitter mit hoher örtlicher Auflösung im Herstellungsprozeß, ebenso die durch die Mikrominiaturisierung möglich werdende Verwendung von niederenergetischen Elektronen mit Energien zwischen 10 und 1000 eV. Es ist auch möglich, bis zu 10 kV Elektronen auf dem Chip zu erzeugen und die Führung durch miniaturisierte elektronenoptische Bauelemente wie Mikrolinsen und Ablenkelemente zu realisieren.

Bei der Verwendung derart energiereicher Elektronen ist auch die Erzeugung von Strahlung bei kurzen Wellenlängen vom mittleren infraroten bis hin zum sichtbaren Spektralbereich möglich. Durch Fertigung auf dem gemeinsamen Substrat ist die direkte Ankopplung an das Gitter auf kürzester Strecke zur Quelle und die Herstellung des Gitters und der Quelle auf demselben Chip gewährleistet. Dadurch wird der Strahlengang der Elektrodenanordnung, der im herkömmlichen Ausführungsfall bis zu einem Meter beträgt, auf unter 1 mm bis 10 mm Länge reduziert. Außerdem wird eine sehr hochkohärente und lokale Lichtquelle erzeugt, was der zeitlichen und der räumlichen Kohärenz der Strahlung zugute kommt. Durch die stärkere Verkürzung des gesamten Elektronenweges ist es nicht mehr erforderlich, Höchstvakuum oder Hochvakuum im Strahlraum anzuwenden. Es ist ausreichend, in einer Flipchip-Bond-Technik das System durch ein in Silizium geätztes Fenster abzudecken. Dieses Fenster ist durch eine durchgehende Membran aus Silizium geschlossen, wodurch ein Hohlraum ermöglicht wird. Das bis zu 10 μm hohe Bauelement ist in dem Hohlraum leicht unterzubringen. Typischerweise ätzt man in ein Siliziumwafer von 250 μm Dicke Fenster von einigen Millimetern Durchmesser, die durch eine Membran mit einer Dicke von 10 μm bis 100 μm abgeschlossen sind. Auf diese Weise ist eine stabile mechanische Kapselung des miniaturisierten Bauelements möglich. Es kann aber auch in mikromechanischer Weise mit Millimeter-Dimensionen gefertigt werden. Das erforderliche Vakuum beträgt dabei ca. 0,01 Torr. In diesem Fall ist dann die mittlere freie Weglänge der Elektronen in diesem Gas verminderten Drucks so groß wie die Strahllänge des miniaturisierten Bauelements. Auf diese Weise ist keine Pumpenanordnung mehr erforderlich, was von großem Vorteil ist. Das Bauelement kann als gefertigtes abgeschlossenes Element abgepackt und

angeschlossen werden. Es ist auf diese Weise möglich, auf einem Halbleiterchip eine Terahertz-Strahlungsquelle, das heißt eine Millimeter- und Submillimeter-Strahlungsquelle zu erzeugen, die durch entsprechende Wellenführung an weiterführende Anwendungen angeschlossen werden kann.

Weitere Vorteile, Merkmale und Anwendungsmöglichkeiten der miniaturisierten bzw. mikrominiaturisierten Terahertz-Strahlungsquelle, insbesondere deren Aufbau und Wirkungsweise, ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung in Verbindung mit den in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen.

Die Erfindung wird nun anhand von in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispielen näher beschrieben. In der Beschreibung, in den Patentansprüchen, der Zusammenfassung und in der Zeichnung werden die in der hinten angeführten Liste der Bezugszeichen verwendeten Begriffe und zugeordneten Bezugszeichen verwendet.

In der Zeichnung bedeuten:

- Fig. 1 eine Drauf- und eine Seitenansicht eines prinzipiellen Aufbaus einer miniaturisierten Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt;
- Fig. 2 eine Kapselung mit einer Silizium-Membranenstruktur zur Aufrechterhaltung des erforderlichen Vakuums beim Betrieb und
- Fig. 3 eine Zweikammermembranabdeckung des miniaturisierten freien Elektronenlasers.

In Fig. 1 ist die schematische Darstellung des Elektrodenaufbaus für einen miniaturisierten freien Elektronenlaser in Draufsicht und Seitenansicht dargestellt. Die einzelnen dargestellten Elemente werden dabei auch in optischer und/oder Elektronenstrahl-Lithographie und einem bekannten additiven Nanolithographie-Verfahren hergestellt. Sowohl in der Drauf- als in der Seitenansicht sind in folgender Reihenfolge die einzelnen Elemente der miniaturisierten Terahertz-Strahlungsquelle dargestellt. Zunächst sind links die Feldemitterspitzen 1 dargestellt, die über elektrische Anschlüsse oder Verbindungen 2 mit einer regelbaren Spannungsquelle 3 und zum anderen mit einer elektrostatischen Linse 4, die hier aus drei Elektroden besteht, verbunden. Die linke Elektrode ist dabei der Extraktor bzw. die erste Anode der Elektronenquelle. In der Mitte sind Strahlablenker 5 mit Anschlüssen 6 dargestellt, an denen eine Ablenkspannung angelegt ist. Dem Strahlablenker 5 folgt ein Gitter 7 aus Metall durch das der Elektronenstrahl 9, der durch den Strahlablenker 5 abgelenkt wurde, durchläuft und hier als Elektronenstrahl ohne Ablenkung 10 auf eine zweite Anode 8 auftrifft.

In Fig. 2 ist eine Variante einer Kapselung dargestellt. Durch diesen Aufbau wird erreicht, daß die Elektronenquelle, hier in Form der Feldemitterspitzen 1, die elektrostatische Linse 4 zur Fokussierung des Elektronenstrahls 9/10 und der Strahlablenker 5 zur Strahlenablenkung in horizontaler und vertikaler Richtung, die Gitter 7 aus Metall mit unterlegtem Reflektor in Mix-Match-Technik durch additive Nanolithographie auf durch Elektronenstrahl- oder optische Lithographie vorgefertigten Metall-Leiterbahn-Anschlußstrukturen mit integrierten Gitterstrukturen auf ein isolierendes Substrat mit

Terahertz-Reflexionsunterlage im Gitterbereich integriert aufbaubar ist und in einer Technologie, die für Terahertz-Strahlung transparent ist, in einem Vakuum 13 dicht gekapselt ist. Durch diesen Aufbau ist es möglich, daß der aus dem Feldemitter 1 austretende Elektronenstrahl 9 durch miniaturisierte Drahtlinsen 4 fokussiert und durch integrierte Ablenkplatten 5 relativ zur Lage der Gitter 7 geführt und positioniert werden kann, wodurch Terahertz-Strahlung erzeugt wird, deren Intensität und Wellenlänge variiert und selektiert werden kann. Die Feldemitter bzw. Feldemitterspitzen 1 sind über einen elektrischen Anschluß 2 mit einer regelbaren Spannungsquelle 3 verbunden und außerdem mit einer elektrischen Verbindung 2 mit der mittleren Elektrode der elektrostatischen Linse 4. Die linke elektrische Elektrode der Linse 4 ist die erste Anode der Elektronenquelle und ist zusammen mit einem Anschluß der regelbaren Spannungsquelle 3 mit Masse verbunden, wie auch die auf der anderen Seite der mittleren Elektrode liegende Elektrode der elektrostatischen Linse 4. Die Feldelektronenquelle mit den Feldemittern 1 ist ein durch additive Nanolithographie aufgebauter Draht aus gut leitfähigem Material mit stabilisierendem Vorschaltwiderstand und so ausgeführt, daß der Elektronenstrahl 9 parallel zur Oberfläche austritt. Das bedeutet, daß der Draht durch eine rechnergesteuerte Depositions-Lithographie in einer geraden oder bogenförmigen Ausführung frei über die Oberfläche der Leiterbahnstruktur endend hergestellt ist. Die Feldelektronenquelle ist punktförmig ausgeführt und auf ihre Feldemitterspitzen 1 ist mit Hilfe additiver Nanolithographie eine Material mit niedriger Austrittsarbeit aufgebracht worden, so daß schon bei relativ niedrigen Spannungen Elektronen emittiert werden.

Eine Variante des Aufbaues besteht darin, daß hinter der Feldelektronenquelle mit den Feldemittern 1 ein Beschleunigungsgitter als Strahlablenker 5 in Form einer freistehenden Elektrode aus zwei Zylinderstäben oder einem stehenden Draht ring angebracht ist. Das dient dazu, daß die Elektronen beschleunigt werden und in nachfolgende zusätzlich aufgeführte runde Multipol- und/oder Zylinderlinsen geführt werden, wodurch die Ausbreitung des Elektronenstrahls 9 über das nachfolgende Beugungsgitter 7 in homogenem Abstand zur Oberfläche zusätzlich gelenkt wird. Die Fokussierungs- und Strahlführungslinsen, die durch additive Nanolithographie auf der durch Elektronenstrahlolithographie oder optische Lithographie hergestellten Metallanschlußstruktur realisiert werden, sind so aufgebaut, daß ein in dieser Technik hergestelltes und ca. 1 mm bis 1 cm langes Beugungsgitter mit Gitterperioden von 0,5 bis 10 μ , je nach Wellenlänge der auszusendenden Terahertz-Strahlung, folgt.

Eine Variante des Aufbaus besteht noch darin, daß mehrere elektrisch getrennte Beugungsgitter nebeneinander angeordnet werden und diese durch Selektion verschiedener Quellen aktiviert werden können, was zur Auswahl verschiedener emittierter Wellenlängen dient.

Die Strahlung der Elektronenquelle wird durch eine Regelschaltung, insbesondere eine regelbare Spannungsquelle 3, konstant gehalten und der das Gitter 7 überfliegende Elektronenstrahl 10 wird dann auf einer zweiten Anode 8, die als Sammelanodenelektrode dient, aufgenommen.

Zwischen der zweiten Erdelektrode der elektrostatischen Linse 4 und der zweiten Anode 8 ist ein Feld angelegt, mit dem die Elektronengeschwindigkeit längs des Gitters

verändert werden kann, was zur Feineinstellung der Wellenlänge und auch zur Erzeugung eines Frequenzspektrums dient.

In Fig. 2 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel des Aufbaus der miniaturisierten bzw. mikrominiaturisierten Terahertz-Strahlungsquelle, basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt, gezeigt. Durch Kapselung mit einer Silizium-Membranstruktur kann das erforderliche Vakuum 13 zum Betrieb des Lasers aufrechterhalten werden. Die emittierte Laser-THz-Strahlung 15 wird durch ein Membranfenster 14 nach außen abgestrahlt. Der auf einem Chip aus Silizium 11 aufgebaute Strahler aus Feldemissionsquelle, Optik, Gitter und Anode ist in diesem Ausführungsbeispiel durch das Membranfenster 14 abgedeckt, das wie das gesamte Abdeckchip 17 aus Silizium 11 besteht. Der so aufgebaute Strahler wird in einem Vakuumsystem vor dem Bonden auf einen Druck von 10^{-4} Torr evakuiert, der für 1 Millimeter mittlere freie Weglänge ausreicht. Der Hohlraum wird anschließend im Vakuum durch thermisches Bonden, ohne die Spannungszuführung kurzzuschließen, verschlossen. Die Membranfenster 14 im Abdeckchip 17 sind mit reflexionsmindernden Schichten behandelt, so daß für den Frequenzbereich der emittierenden Strahlung eine maximale Transmission durch das Fenster 14 erreicht wird.

Unter dem Gitterbereich ist ein THz-Strahlungsreflektor in Form einer Metallschicht oder Anordnung von Gitterstäben mit definiertem Abstand geeigneter Periode aus magnetischen oder unmagnetischen Materialien angeordnet, so daß die THz-Strahlung 15, die das Gitter 7 in Substratrichtung verläßt, mit höchstmöglichem Reflexionsgrad durch das Gitter zurückgesandt wird und so daß die Intensität der abgesandten Strahlung verstärkt wird. Durch eine Strahlführung über dem Gitter 7 mit definiertem Abstand ist

es möglich, die Intensität der Strahlungsquelle zu variieren, das heißt daß durch den Einsatz des Ablenkelementes 5 vor dem Gitter die abgestrahlte Intensität bei Anlegen einer Wechselspannung an dieses Ablenkelement moduliert werden kann. Auf diese Weise kann die Strahlung für spektroskopische Zwecke für Lock-In-Meßtechniken schon gleich moduliert erzeugt werden. Die selbe Lock-In-Modulation ist auch durch die Modulation der Extraktionsspannung an der Feldemitterspitze 1 möglich.

Für bestimmte Anwendungen ist es vorteilhaft, die Strahlungsquelle um einen auf einer darüberliegenden Fläche aufgebauten Monochromator in Form einer auf diesem Bereich wirksamen Nanometer- bzw. Mikrometerstruktur zu ergänzen, so daß Strahlen, die mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden, die Strahlungsquelle in unterschiedliche Richtungen verlassen. Auf diese Weise kann durch Umschalten der Elektronenenergie, was im elektrostatischen System nach dem elektrostatischen Prinzip immer dieselbe Fokussierung und damit gleichbleibende Betriebsbedingungen ergibt, Strahlung unterschiedlicher Frequenz erzeugt werden und die Strahlungsquelle auf diese Weise für verschiedene Anwendungen elektrisch durchgestimmt werden.

Zwischen der Fokussierungslinse 4 und dem Ende des Gitters 7 wird in einer Variante ein elektrisches Feld angelegt, in dem am Ende des Gitters eine zusätzliche Elektrode angeordnet ist, die durch die angelegte Spannung die fliegenden Elektronen beschleunigen bzw. abbremsen kann. Auf diese Art und Weise ist es möglich, den Energieverlust der Elektronen, der beim Vorbeiflug am Gitter 7 auftritt, auszugleichen. Das Gitter 7, über das der Elektronenstrahl 10 fliegt, ist in Bereiche, die parallel zur Strahlrichtung liegen, unterteilt, in welchen unterschiedliche

Gitterkonstanten realisiert sind. Durch horizontale, elektrostatische Strahlführung, bewirkt durch parallel zum Gitter 7 angeordnete Elektroden, bzw. durch Verwendung mehrerer Elektronenquellen, von denen je eine dem einzelnen Bereich zugeordnet ist, ist es jetzt möglich, auf diese Art und Weise die emittierende Strahlung in ihrer Wellenlänge umschaltbar zu realisieren.

Das Gitter variiert in seiner Gitterkonstante quer zur Strahlrichtung, so daß durch Ablenkfelder oder das Gitter insgesamt umschließende Ablenkplatten, die hinter der Fokussierungslinse angeordnete sind, die Strahlführung über dem Gitter so verändert werden kann, daß ein Bereich einer anderen Gitterkonstante zur Emission der Wellenlänge der Strahlung auswählbar wird. Wenn das Gitter als "chirped grating", das heißt Gitter mit variabler Gitterkonstante, ausgeführt ist, ist eine Einstellung der Wellenlänge in kontinuierlicher Weise möglich.

Die Intensitätssteuerung der Terahertz-Strahlungsquelle erfolgt dadurch, daß unter und über dem Gitter eine für THz-Strahlung transparente elektrostatische Platte angebracht ist, wodurch die Intensität örtlich selektiert werden kann. Dies wird mit Vorteil dadurch erreicht, daß diese elektrostatischen Platten mit unterschiedliche Potentiale besitzenden Bereichen ausgeführt sind, das heißt, daß Streifen aufgeführt sind, die getrennt eingestellt werden können.

In Fig. 3 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel gezeigt, das in dem Abdeckchip 17 mit zwei Membranfenstern 14 ausgestattet ist. Wie in Fig. 2 ist auch hier ganz deutlich zu sehen, daß das Abdeckchip 17 von den Elektroden und den Anschlüssen der Elektroden durch einen Isolator aus

Silizium 16 isoliert ist. Dieser ist auch gleichzeitig Bondbereich 7 zum Vakuumdichten beim Verkapseln der Anordnung. Der Aufbau besteht wiederum aus dem Träger aus Silizium 11 mit einer Siliziumdioxidschicht 12. Darauf sind der Feldemitter 1, die Linsen 4, das Gitter 7 und die zweite Anode 8 angeordnet. Die erste Anode ist auch hier wieder die linke Elektrode der elektrostatischen Linse 4. Außerdem ist wieder das Gitter 7 aus Metall angeordnet, aus der die emittierte Terahertz-Strahlung 15 austritt. Der Elektronenstrahl 10 ohne Ablenkung trifft auf die zweite Anode 8 mit elektrischem Anschluß 2. Das eine Membranfenster 14 ist mit einer Linse 19 zur Fokussierung der THz-Strahlung 15 versehen. In beiden Kammern 18, 18' ist durch das besonders geformte Abdeckchip 17 ein Vakuum 13 vorhanden, wobei in der zweiten Kammer 18' eine nichtdargestellte Getterpumpe mit ihrem Material durch einmalige Aktivierung durch Stromdurchgang in Betrieb gesetzt werden kann, um das Gesamtvolumen der beiden Kammern auf den erforderlichen Arbeitsdruck zu bringen.

In einer weiteren nichtdargestellten Variante sind auf dem Chip neben dem Smith-Purcell-Element durch den elektrischen Anschluß aktivierbare Ionengettermaterialien angebracht, die zum Auspumpen der gebondeten und gekapselten Struktur dienen. Die Art der Herstellung mit Hilfe der additiven Nanolithographie auf durch Elektronenstrahl- oder optische Lithographie vorgefertigten Metall-Leiterbahn-Anschlußstrukturen mit integrierten Gitterstrukturen auf isolierendem Substrat, insbesondere Siliziumoxid, mit THz-Reflexionsunterlage im Gitterbereich integriert aufgebaut, ermöglicht ein solches Bauelement, das in jedweder Lage als modular verfügbare THz-Strahlungsquelle einsetz- und anordnungsbar ist.

Liste der Bezugszeichen

- 1 Feldemitter(spitzen)
- 2 elektrischer Anschluß oder Verbindungen
- 3 regelbare Spannungsquelle
- 4 elektrostatische Linse
- 5 Strahlablenker oder Ablenkplatten
- 6 elektrische Anschlüsse für Strahlablenker
- 7 Gitter aus Metall
- 8 zweite Anode
- 9 Elektronenstrahl
- 10 Elektronenstrahl ohne Ablenkung
- 11 Silizium (Si)
- 12 Siliziumdioxid (SiO_2)
- 13 Vakuum
- 14 Membranfenster aus Silizium
- 15 emittierte Terahertz-Strahlung
- 16 Isolator oder Bondbereich zum vakuumdichten
Kapseln der Anordnung
- 17 Abdeckchip
- 18,18' Kammern
- 19 Linse zur Fokussierung der THz-Strahlung

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt, bei dem aus einer fokussierten Elektronenquelle ein energiereiches Bündel von Elektronen in einem definierten Abstand über ein Metallgitter aus querstehenden Gitterstäben gesandt wird, so daß durch eine im Profil des Gitters schwingende Bildladung eine elektromagnetische Welle einer Wellenlänge ausgesandt wird, welche durch die Periodizität der Stege und der Elektronengeschwindigkeit einstellbar ist, dadurch gekennzeichnet,

daß die Elemente der Strahlungsquelle wie Feldemitter (1), elektrostatische Linse (4), Strahlablenker (5), Gitter (7) aus Metall und eine zweite Anode (8) auf einem Halbleiterchip mit Hilfe additiver oder bekannter Nanolithographie-Verfahren integriert angeordnet sind.

2. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

daß die Feldelektronenquelle als ein durch additive Nanolithographie aufgebauter Draht aus gut leitfähigem Material mit stabilisierendem Vorschaltwiderstand ausgeführt ist und

daß der Draht durch rechnergesteuerte Depositions-Lithographie in einer geraden oder auch bogenförmigen Ausführung frei über der Oberfläche der Leiterbahnstruktur für die elektrischen Anschlüsse und Verbindungen (2) in Feldemitterspitzen (1) endend

angeordnet ist.

3. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach den Patentansprüchen 1 und 2, dadurch gekennzeichnet,

daß die Feldelektronenquelle punktförmig ausgeführt ist und auf ihre Feldemitterspitze(n) (1) durch additive Nanolithographie ein Material mit niedriger Austrittsarbeit aufgebracht ist, das bei relativ niedrigen Spannungen bereits Elektronen emittiert.

4. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach den Patentansprüchen 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,

daß die Elemente durch ein Abdeckchip (17) vakuumdicht gekapselt sind.

5. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet,

daß der Strahlablenker (5) zur Ablenkung des Elektronenstrahls (9) in horizontaler und vertikaler Richtung sowie das Gitter aus Metall (7) mit unterlegtem Reflektor in Mix- und Match-Technik durch additive Nanolithographie oder auch durch Elektronenstrahl- oder optische Lithographie auf vorgefertigten Metall-Leiterbahnanschlußstrukturen mit integrierten Gitterstrukturen auf einer Schicht aus Siliziumdioxid (12) eines Substrats aus Silizium (11) mit THz-Reflektorunterlage im Gitterbereich integriert aufgebaut ist und die gesamte Anordnung für die Terahertz-Strahlung (15) transparent vakuumdicht gekapselt ist,

daß der aus der integrierten Elektronenquelle austretende Elektronenstrahl (9) durch die elektrostatische Linse (4) in Form von miniaturisierten Drahtlinsen fokussiert wird und durch integrierte Ablenkplatten (5) relativ zur Lage der Metallgitter (7) führ- und positionierbar ist und

daß dadurch eine Terahertz-Strahlung (15) erzeugt wird, deren Intensität und Wellenlänge variierbar und selektierbar ist.

6. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle, insbesondere nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1, dadurch gekennzeichnet,

daß zur Beschleunigung der Elektronen hinter der Feldelektronenquelle ein Beschleunigungsgitter in Form einer freistehenden Elektrode aus zwei Zylinderstäben oder einem stehenden Drahttring angeordnet ist und

daß die beschleunigten Elektronen in dem Beschleunigungsgitter nachgeordnete runde Multipol- oder Zylinderlinsen einer elektrostatischen Linse (4) gelangen, und daß sich ein Elektronenstrahl ohne Ablenkung (10) über ein nachfolgendes Metallgitter (7) in einem homogenen Abstand zur Oberfläche ausbreitet.

7. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet,

daß auf die elektrostatische Linse (4) und den Strahlablenker (5), die mit Hilfe additiver Nanolithographie auf der durch Elektronenstrahlolithographie oder optische

Lithographie hergestellten Metallstruktur für elektrische Anschlüsse oder Verbindungen (2, 6) realisiert sind, ein in dieser Technik hergestelltes ca. 1 mm bis 1 cm langes Metallgitter (7) mit Gitterperioden zwischen 0,5 und 10 μm , je nach Wellenlänge der auszusendenden Terahertz-Strahlung (15) nachfolgend angeordnet ist.

8. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet,

daß mehrere elektrisch getrennte Beugungsgitter als Gitter aus Metall (7) nebeneinander angeordnet sind, die durch Selektion verschiedener Quellen zur Auswahl verschiedener emittierter Wellenlängen aktivierbar sind.

9. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet,

daß auf einem Halbleiterchip neben dem Smith-Purcell-Element durch eine Elektrode aktivierbare Ionengettermaterialien zum Herstellen und Aufrechterhalten des erforderlichen Vakuums (13) in der gebondeten und gekapselten Struktur angebracht sind.

10. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet,

daß zum Konstanthalten der Strahlung der Elektronenquelle eine regelbare Spannungsquelle (3) über elektrische Anschlüsse oder Verbindungen (2) mit der Elektronenquelle verbunden ist und

daß der die Feldemitterspitzen (1) verlassende Strahl (9) auf einer als zweiten Anode dienenden Elektrode der Anordnung gesammelt wird.

11. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet,

daß zur Feineinstellung der Wellenlänge bzw. zur Erzeugung eines gewünschten Frequenzspektrums zwischen Erdelektrode der elektrostatischen Linse (4) und der als zweiten Anode wirkenden Elektrode zur Veränderung der Elektronengeschwindigkeit längs des Gitters (7) eine Spannung angelegt ist.

12. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle, insbesondere nach einem der Patentansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet,

daß die auf einem Halbleiterchip aufgebaute miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle aus Feldemitter bzw. Feldemitterspitzen (1), einer Optik aus einer elektrostatischen Linse (4), einem Gitter (7) und einer zweiten Anode (8) durch ein in Silizium-Membrantechnik geätztes Membranfenster (14) abgedeckt ist und in einem Vakuumsystem vor dem Bonden auf einen Druck in einem Bereich von 10^{-4} Torr evakuierbar ist, der für eine mittlere freie Weglänge von 1 Millimeter ausreicht und

daß die Kammer(n) (18, 18') im Vakuumsystem durch thermisches Bonden, ohne die Spannungszuführung kurzzuschließen, kapsel- bzw. verschließbar ausgeführt ist bzw. sind.

13. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 12; dadurch gekennzeichnet, daß zwei Membranfenster (14) für zwei Kammern (18, 18') nebeneinander in dem Abdeckchip (17) angeordnet sind und
- daß in einem der beiden Membranfenster (14) eine Getterpumpe durch einmalige Aktivierung mittels Stromdurchgang in Betrieb gesetzt wird und das Gesamtvolumen der beiden gebildeten Kammern (18, 18') den erforderlichen Arbeitsdruck erhält.
14. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Membranfenster (14) im Abdeckchip (17) durch zusätzlich aufgebrachte Schichten reflexionsvermindernd behandelt sind.
15. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß unter dem Gitterbereich ein Terahertz-Strahlungsreflektor in Form einer Metallschicht oder in Form einer Anordnung von Gitterstäben mit definiertem Abstand geeigneter Periode aus magnetischen oder unmagnetischen Materialien zur Verstärkung der Intensität der emittierten Terahertz-Strahlung (15) angeordnet ist.
16. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet,

daß durch die Strahlführung über dem Gitter aus Metall (7) mit definiertem Abstand die Intensität der Strahlungsquelle variierbar ist,

daß durch den Einsatz eines zusätzlichen Ablenkelementes vor dem Gitter (7) die abgestrahlte Intensität durch Anlegen einer Wechselspannung an dieses Ablenkelement modulierbar ist.

17. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet,

daß die Terahertz-Strahlung (15) für spektroskopische Zwecke moduliert erzeugbar ist und

daß dieselbe Lock-In-Modulation auch durch die Modulation der Extraktionsspannung an der Feldemitterspitze (1) generierbar ist.

18. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet,

daß die Quelle um einen auf einer darüberliegenden Fläche aufgebauten Monochromator in Form einer für diesen Bereich wirksamen Nanometer- bzw. Mikrometerstruktur ergänzt ist und

daß Terahertz-Strahlen (15), die mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt werden können, die Quelle in unterschiedliche Richtungen verlassen.

19. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet,

daß zwischen der elektrostatischen Linse (4) zur Fokussierung und dem Ende des Gitters (7) ein elektrisches Feld angelegt ist, in dem am Ende des Gitters eine zusätzliche Elektrode der zweiten Anode angeordnet ist, die durch die angelegte Spannung die fliegenden Elektronen entweder beschleunigt oder abbremst.

20. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet,

daß das Gitter (7) in Bereiche eingeteilt ist, die parallel zur Strahlrichtung liegen, in denen unterschiedliche Gitterkonstanten realisiert sind und

daß ein laterales Ablenk-Element zur Strahlführung bzw. Wellenlängenselektion um die Gitterbereiche herum aufgebaut ist bzw. Gruppen von Feldemittern selektiv angesteuert werden.

21. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 20, dadurch gekennzeichnet,

daß das Gitter (7) in seiner Gitterkonstante quer zur Strahlrichtung variiert, sodaß Ablenkkfelder oder das Gitter (7) insgesamt umschließende Ablenkplatten als Strahlablenker (5) angeordnet sind, wodurch die Strahlführung über dem Gitter (7) so veränderbar ist, daß ein Bereich einer anderen Gitterkonstante zur Emission der Wellenlänge der Terahertz-Strahlung (15) ausgewählt wird und daß insbesondere bei einem Gitter (7) mit variabler Gitterkonstante die Wellenlänge in kontinuierlicher Weise einstellbar ist.

22. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 21, dadurch gekennzeichnet,

daß für die Intensitätssteuerung unter und über dem Gitter (7) eine für die Terahertz-Strahlung (15) transparente elektrostatische Platte angeordnet ist, mit der im gesamten Gitterbereich die Lage des Elektronenstrahls (10) variierbar ist.

23. Miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle nach einem der Patentansprüche 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet,

daß sie in jeder räumlichen Lage als modular verfügbares Bauteil einsetzbar ausgeführt ist.

Z U S A M M E N F A S S U N G

Es wird eine miniaturisierte Terahertz-Strahlungsquelle basierend auf dem Smith-Purcell-Effekt angegeben, bei dem aus einer fokussierten Elektronenquelle ein energiereiches Bündel von Elektronen in einem definierten Abstand über ein Metallgitter aus querstehenden Gitterstäben gesandt wird, so daß durch schwingende Bildladungen elektromagnetische Wellen einer Wellenlänge ausgesandt werden, die durch die Periodizität der Stege und der Elektronengeschwindigkeit einstellbar ist. Die Elemente der Strahlungsquelle wie Feldemitter (1), elektrostatische Linse (4), Strahlablenker (5), Gitter (7) aus Metall und eine zweite Anode (8) sind auf einem Halbleiterchip mit Hilfe additiver Nanolithographie-Verfahren integriert angeordnet. Die Feldelektronenquelle ist als ein durch additive Nanolithographie aus der Oberfläche herausragender Draht aus gut leitfähigem Material mit stabilisierendem Vorschaltwiderstand ausgeführt. Der Draht wird durch rechnergesteuerte Depositions-Lithographie in gerader oder bogenförmiger Ausführung freitragend aufgebaut. Das Grundmaterial trägt in seiner Oberfläche eine Leiterbahnstruktur für die elektrischen Anschlüsse und Verbindungen (2) mit regelbaren Spannungsquellen (3) zur Versorgung der Feldemitterspitzen (1), Linse (4) und Steuerelektroden (5, 8). Die Terahertz-Strahlungsquelle ist in jeder räumlichen Lage als modular verfügbares Bauteil einsetzbar ausgeführt und leistungsstark.

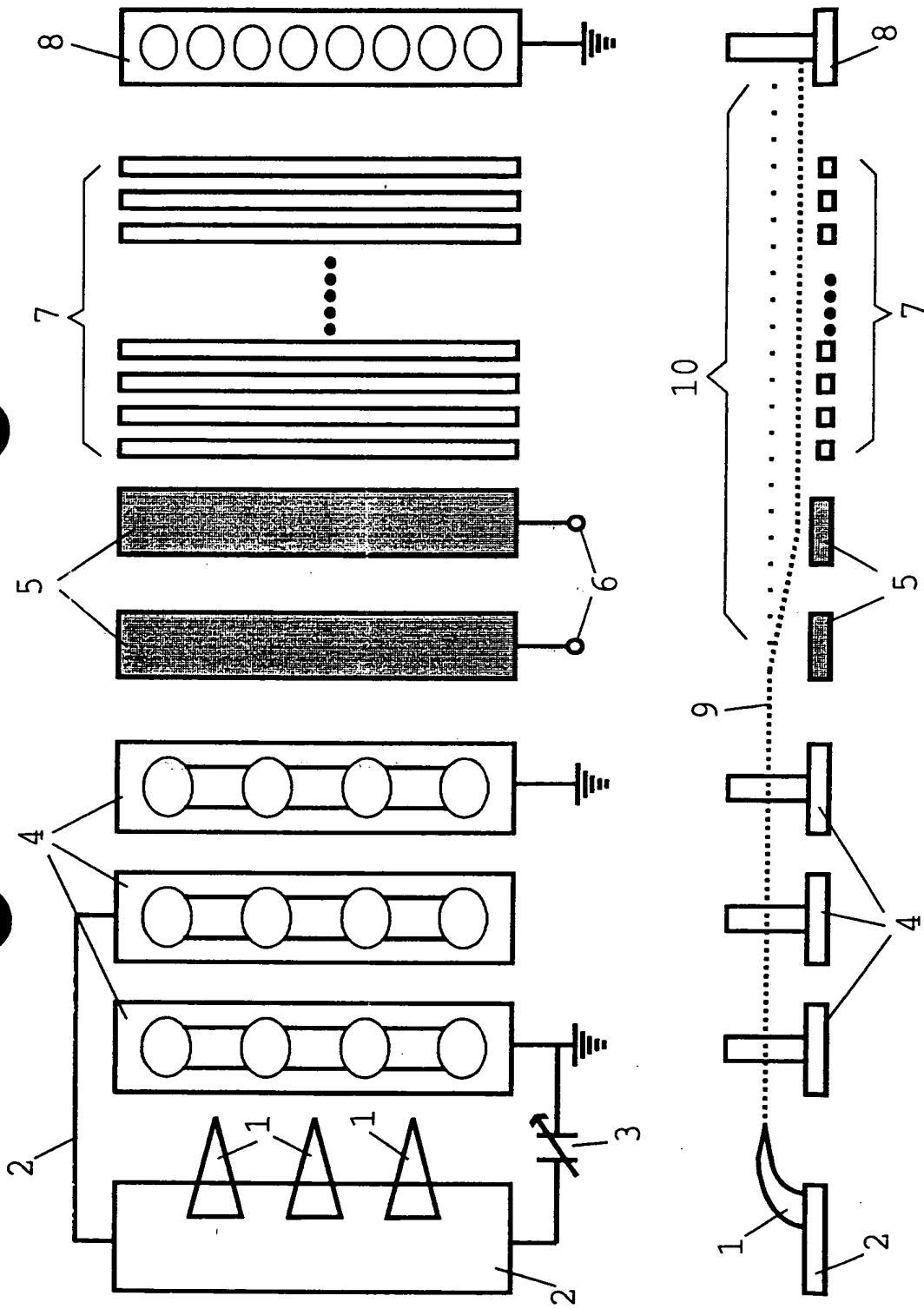


FIG. 1

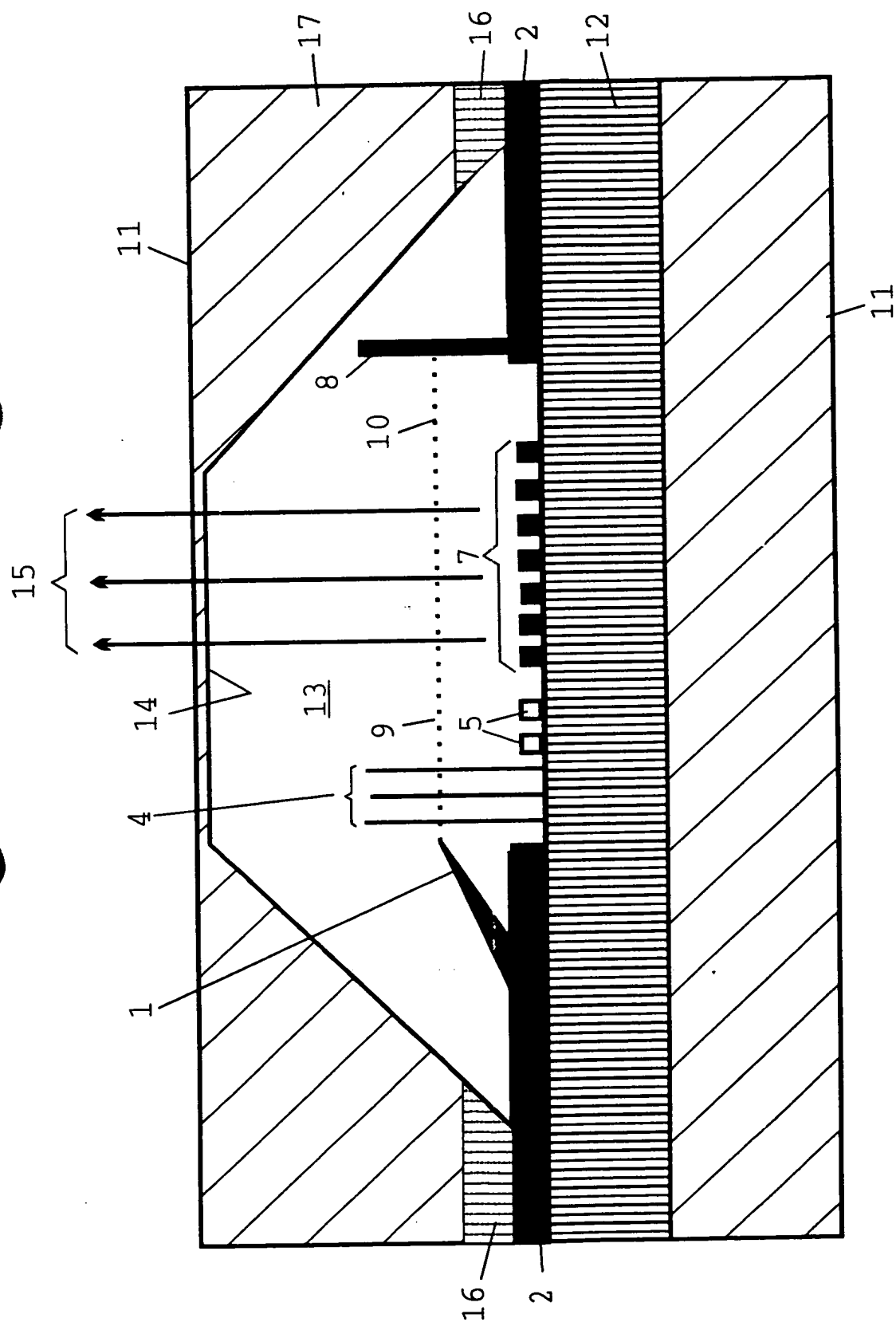


FIG. 2

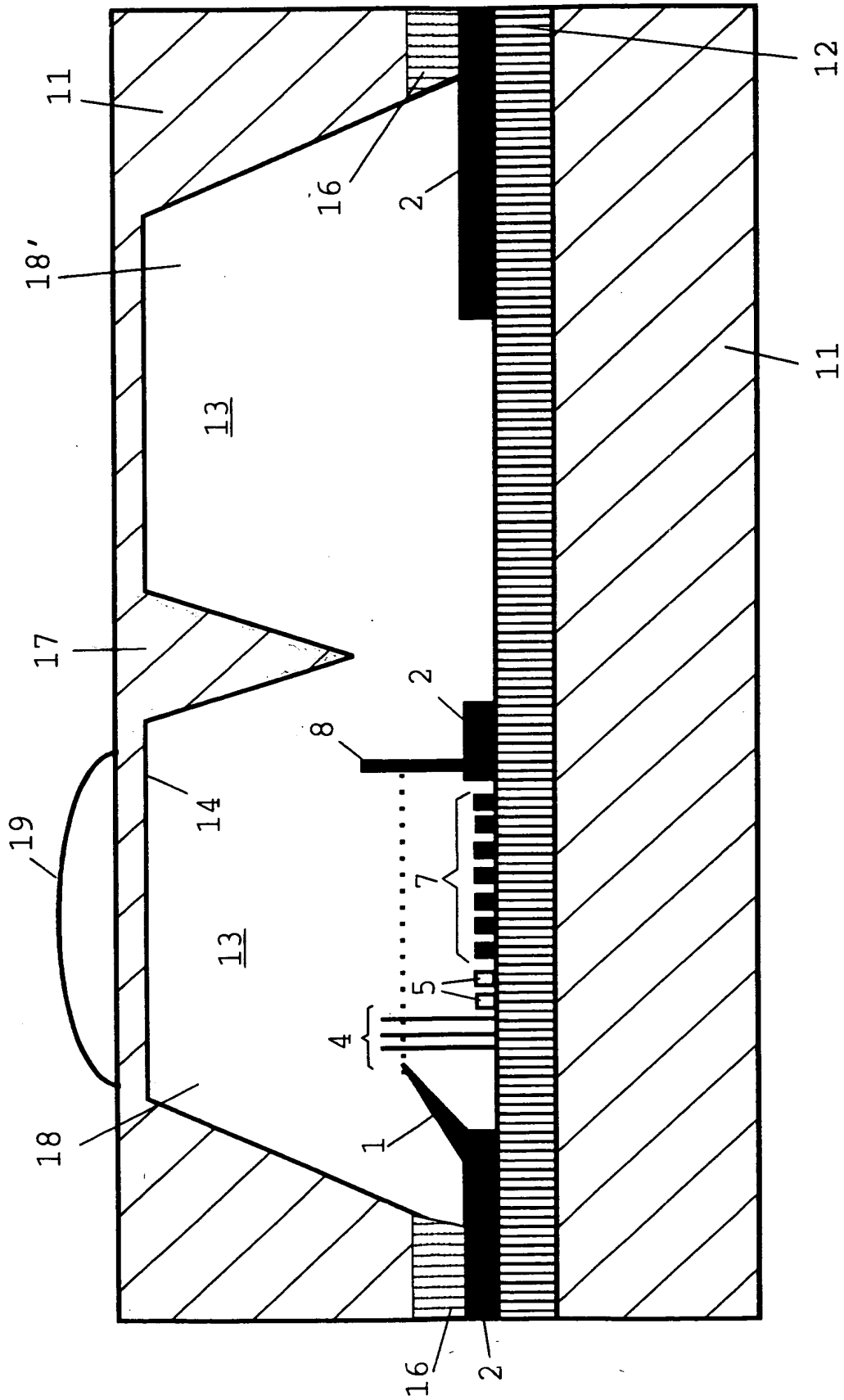


FIG. 3